

mgr inż. Oliwia Kaniuk^{1*)}dr inż. Dorota Marcinczak¹⁾

ORCID: 0000-0001-9496-2638

dr inż. Krzysztof Marcinczak¹⁾

ORCID: 0000-0002-8789-5243

Experimental analysis of butt joints in precast reinforced concrete elements

Analiza doświadczalna doczołowych połączeń w prefabrykowanych elementach żelbetowych

DOI: 10.15199/33.2026.09.11

Abstract. This paper is devoted to a comparative analysis of two types of butt joints used in reinforced concrete beams: traditional ‘robust’ solutions and bolted connection systems. The paper presents a full-scale experimental analysis of both types of joints. The specific characteristics of static behaviour, failure mechanisms and the susceptibility of the joints to loads are discussed. The main objective of the study was to assess the behaviour of the interface under bending loads during a four-point bending test. As part of the research, strain maps were generated using a Digital Image Correlation system, and force-deflection curves were plotted to determine the stiffness of the joints.

Keywords: reinforced concrete structures; prefabrication; joints in precast reinforced concrete.

Streszczenie. W artykule zaprezentowano analizę porównawczą dwóch typów połączeń doczołowych stosowanych w belkach żelbetowych – rozwiązań tradycyjnych typu „robusta” oraz systemowych połączeń śrubowych. Przedstawiono też pełnoskalową analizę ekperymentalną obu typów węzłów i omówiono specyfikę pracy statycznej, mechanizmy niszczenia oraz podatność połączeń na obciążenia. Głównym celem pracy była ocena zachowania się strefy styku pod wpływem obciążeń zginających podczas próby czteropunktowego zginania. W ramach badań zarejestrowano mapy odkształceń za pomocą systemu Cyfrowej Korelacji Obrazu i wyznaczono krzywe siła-ugięcie, określając sztywność połączeń.

Słowa kluczowe: konstrukcje żelbetowe; prefabrykacja; połączenia prefabrykatów betonowych.

Prefabricated elements are increasingly used in modern construction, contributing to shorter construction times, cost optimisation and improved construction quality. Prefabricated reinforced concrete elements are used in residential, industrial and infrastructure construction [1]. An important practical aspect of prefabrication is the reduction of wet works on site. This enables structures to be erected under adverse weather conditions and significantly faster than monolithic structures. A key issue in the design of precast structures, determining their durability and reliability, is the method used to connect individual elements [2]. Joints are critical locations where internal forces are transferred between structural elements. The appropriate design and detailing of structural connections must ensure adequate load-bearing capacity, stiffness and ductility, understood as the ability to undergo plastic deformations without loss of load-bearing capacity. The joint must be designed and constructed so that it does not alter the structural system assumed for the analysis of the individual structural elements. Furthermore, in order to fully exploit the potential of prefabrication, the joint should allow simple and rapid assembly while ensuring the safety and durability of the structure.

In recent years, traditional methods, such as joining elements using steel dowels, referred to as projecting bars installed in Robusta pipes [2], have increasingly been replaced by proprietary bolted connection systems [3].

W współczesnym budownictwie coraz częściej stosuje się elementy prefabrykowane, co wpływa na skrócenie czasu realizacji inwestycji, optymalizację kosztów oraz poprawę jakości wykonania. Prefabrykowane elementy żelbetowe są wykorzystywane w budownictwie mieszkaniowym, przemysłowym oraz infrastrukturalnym [1]. Głównym aspektem praktycznym w stosowaniu prefabrykacji jest dążenie do ograniczenia robót mokrych na budowie. Pozwala to na wznoszenie konstrukcji w trudnych warunkach atmosferycznych oraz znacznie szybciej niż konstrukcji monolitycznych. Kluczowym zagadnieniem przy projektowaniu konstrukcji prefabrykowanych, determinującym jej trwałość i niezawodność, jest sposób łączenia ze sobą poszczególnych elementów [2]. Węzły są niewątpliwie miejscem, w którym przekazywane są siły wewnętrzne pomiędzy elementami. Prawidłowe ukształtowanie i wymiarowanie połączeń konstrukcyjnych musi zapewnić nośność, sztywność oraz ciągliwość rozumianą jako zdolność przenoszenia odkształceń plastycznych bez utraty nośności. Złącze musi zostać zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby nie zmieniało schematu statycznego przyjętego do obliczenia konkretnych elementów konstrukcji. Ponadto, aby w pełni wykorzystać potencjał prefabrykacji, złącze powinno umożliwiać prosty i szybki montaż oraz gwarantować bezawaryjność i trwałość konstrukcji.

W ostatnich latach tradycyjne metody, takie jak montaż elementów na pręty stalowe nazywane wytykami w rurach karbowanych [2], są zastępowane przez systemowe łączniki skręcane [3]. Nowoczesne systemy dostępne na

¹⁾ Politechnika Wrocławska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Correspondence address: krzysztof.marcinczak@pwr.edu.pl

Modern systems available on the market provide immediate load-bearing capacity of the assembled elements, making it possible to eliminate additional temporary supports or bracing. At the same time, they provide high connection accuracy, facilitating the rapid and effective alignment of elements during assembly.

This paper presents the results of experimental tests on butt joints between precast reinforced concrete elements arranged as column-to-column and beam-to-beam connections. The elements were manufactured by a precast concrete plant. A comparative analysis of two types of butt joints used in reinforced concrete beams was carried out: traditional 'Robusta' joints and proprietary bolted connection systems. Full-scale tests of both types of joints were performed. Their static behaviour, failure mechanisms and response to loading were analysed [4 ÷ 6]. The tests constitute a preliminary stage in the analysis of hybrid joints combining both assembly technologies.

Description of the tested elements

A total of six C35/45 concrete specimens were prepared for testing. Each specimen consisted of two parts connected by a butt joint. Three specimens were connected using steel bars inserted into Robusta pipes, while the remaining three were connected using a proprietary bolted connection system. Both connection types are structurally equivalent. The precast concrete plant supplied the individual components to the testing laboratory. The joints were subsequently assembled under laboratory conditions: the reinforcing bars were grouted inside the Robusta pipes using non-shrinkage grout, while the proprietary connectors were assembled by tightening the bolts (Figures 1 and 2).

The assembly of the elements using projecting bars was carried out in two stages. One part of the beam was positioned vertically, with the reinforcing bars inserted into the ducts, which were subsequently filled with non-shrinkage grout. The second part of the element was then slid onto the first part. Spacer blocks were placed between the elements, providing

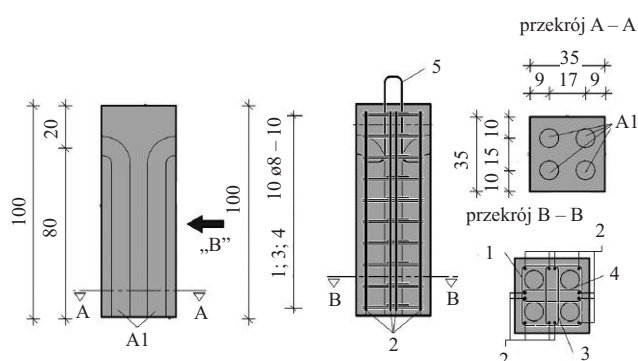


Fig. 1. Components for testing the connection to a Robusta pipe [cm]: A1 – pipe $\varnothing 80/88$; 1, 3, 4 – rebar stirrup $\varnothing 8$; 2 – reinforcing bar $\varnothing 16$; 5 – transport hook

Rys. 1. Elementy składowe do badania połączenia na wtyki [cm]: A1 – rura robusta $\varnothing 80/88$; 1, 3, 4 – strzemie $\varnothing 8$; 2 – pręt zbrojeniowy $\varnothing 16$; 5 – hak transportowy

rynku gwarantują natychmiastową nośność montowanych elementów, co pozwala wyeliminować stosowanie dodatkowych podpór czy rozporów tymczasowych i jednocześnie uzyskać dużą precyzję wykonania złącza, pozwalającą na szybkość i efektywną rektyfikację elementów podczas montażu.

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych połączeń doczołowych w prefabrykowanych elementach żelbetowych typu słup-słup, belka-belka. Elementy zostały przygotowane przez zakład prefabrykacji. Dokonano analizy porównawczej dwóch typów połączeń doczołowych, stosowanych w belkach żelbetowych: rozwiązań tradycyjnych typu „robusta” oraz systemowych połączeń śrubowych. Przedstawiono badania w skali technicznej obu typów węzłów. Omówiono specyfikę pracy statycznej, mechanizmy niszczenia oraz podatność połączeń na obciążenie [4 ÷ 6]. Badania stanowią wstęp do analizy połączeń hybrydowych, które są kombinacją obu technologii montażu.

Opis badanych elementów

Łącznie przygotowano do badań 6 elementów z betonu C35/45. Każdy z nich składał się z dwóch części połączonych doczołowo. Trzy elementy zostały połączone za pomocą prętów zatopionych w rurach robusta, a trzy kolejne za pomocą systemowego połączenia skręcanego. Oba połączenia są równoważne w sensie konstrukcyjnym. Zakład prefabrykacji dostarczył elementy składowe do laboratorium badawczego, a następnie w warunkach laboratoryjnych wykonano połączenia – zalewanie zaprawą montażową prętów zbrojeniowych w rurach robusta oraz skręcanie łączników systemowych (rysunki 1 i 2).

Scalenie elementów na wtyki było realizowane w dwóch krokach. Jedną część belki ustawiono pionowo i umieszczono pręty w kanałach, które następnie wypełniono zaprawą niskoskurczową. Drugą część elementu nasunięto na pierwszą. Pomiędzy elementami ułożono podkładki dystansowe. Dystans pomiędzy elementami wynosił 20 mm.

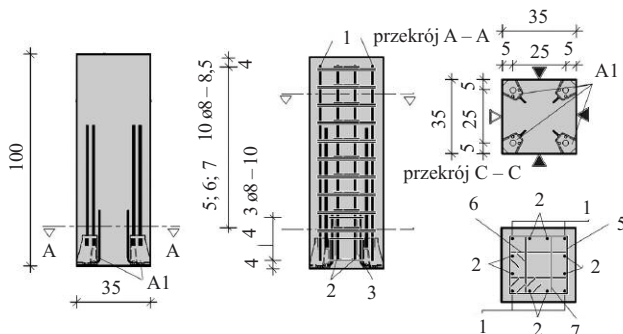


Fig. 2. Components for testing the connection to bolted system joint [cm]: A1 – system column support; 1, 2 – reinforcing bar $\varnothing 16$; 3 – rebar stirrup $\varnothing 12$; 4 – 7 – rebar stirrup $\varnothing 8$; 8 – transport hook

Rys. 2. Elementy składowe do badania systemowego połączenia skręcanego [cm]: A1 – systemowa podpora słupowa; 1, 2 – pręt zbrojeniowy $\varnothing 16$; 3 – strzemie $\varnothing 12$; 4 – 7 – strzemie $\varnothing 8$; 8 – hak transportowy

a 20 mm gap. The joint area was shuttered and non-shrinkage grout was introduced into the ducts from the top (Photo 1a). The bolted connection required less assembly work. Threaded bars, together with washers and nuts, were installed in the first component to maintain the required distance between the elements, as would be the case during actual construction (Photo 1b). The second component was then positioned and the two parts were bolted together. The joint area was shuttered and also filled with non-shrinkage grout.



Photo 1. The process of preparing the test specimens: a) traditional joint with dowels – element before pouring the upper channels; b) bolted system joint – view of the bolted elements

Fot. 1. Przebieg przygotowania badanych elementów: a) połączenie tradycyjne na wytyki – zaszalowany element przed zalaniem górnych kanałów; b) połączenie systemowe skręcane – widok skręconych elementów

Test setup and estimation of the failure load

Each tested element was placed on two support trestles spaced 1.8 m apart. One support was designed as a fixed support, while the other was a movable support. The load was applied at a point to a double T-section acting as a spreader beam. The spreader beam was supported on two rollers spaced 0.6 m apart and transferred two equal concentrated loads to the tested beam (Figure 3), thereby subjecting the beam to four-point bending. This arrangement made it possible to obtain a region of pure bending at the joint location, without the influence of shear or axial force. Two inductive displacement transducers were installed at the bottom of the tested element. One transducer measured the opening of the joint at the centre of its width, while the other measured the deflection at the joint location.

An analytical estimate of the failure load was performed using characteristic values derived from the equilibrium of internal forces in the cross-section. The analysis was carried out for the connection using projecting bars installed in Robusta pipes. By analogy, calculations were performed for the bolted connection. The following assumptions were adopted:

Miejsce styku zaszalowano i od góry kanałów wprowadzono zaprawę niskoskurczową (fotografia 1a). Połączenie skręcane wymagało mniejszego nakładu pracy. W pierwszym elemencie składowym umieszczono pręty gwintowane oraz podkładki i nakrętkę dla zachowania dystansu pomiędzy elementami, tak jak odbywa się to w warunkach budowy (fotografia 1b). Następnie drugi element nasunięto i skręcono obie części ze sobą. Miejsce styku zaszalowano i wypełniono również zaprawą niskoskurczową.

Stanowisko do badań i oszacowanie siły niszczącej

Każdy badany element umieszczano na dwóch kozłach podporowych rozmieszczonych w odległości 1,8 m od siebie. Na jednym skonstruowano podpórę nieprzesuwną, natomiast na drugim podpórę przesuwную. Siła przykładana była punktowo do dwuteownika, który służył za wymian. Ułożony został on na dwóch wałkach w rozstawie 0,6 m, przekazujących na belkę dwie równoważne siły (rysunek 3), dzięki czemu belka poddawana była czteropunktowemu zginaniu. Pozwoliło to na uzyskanie stanu czystego zginania w miejscu połączenia, bez wpływu siły tnącej i osiowej. W dolnej części badanego elementu zainstalowano dwa czujniki indukcyjne. Jeden czujnik służył do pomiaru rozwarcia styku w środku szerokości połączenia, a drugi do pomiaru ugięcia w miejscu styku.

Obliczenia analitycznej siły niszczącej dokonano na wartościach charakterystycznych wynikających z równowagi sił wewnętrznych w przekroju. Analizę przeprowadzono w przypadku połączenia na wytyki w rurach robusta. Przez analogię wykonano obliczenia dotyczące połączenia skręcane. Przyjęto następujące założenia:

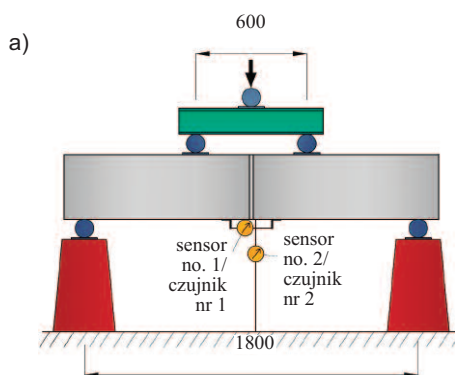


Fig. 3. Test rig: a) the geometry and sensor layout; b) the test setup during measurements

Rys. 3. Stanowisko do badań: a) geometria oraz rozmieszczenie czujników; b) stanowisko podczas wykonywania pomiarów

• characteristic compressive strength of C35/45 concrete: $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$;

• coefficient defining the height of the rectangular concrete stress block for $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ is $\lambda = 0,8$;

• characteristic yield strength of B500SP reinforcing steel: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$;

• reinforcement area in the joint: $2\phi 20, A_{s1,w} = 628 \text{ cm}^2$;

• distance from the section edge to the resultant of the reinforcement force: $a_{1,w} = 90 \text{ mm}$;

• effective depth of the cross-section: $d_w = h - a_{1,w} = 350 \text{ mm} - 90 \text{ mm} = 260 \text{ mm}$;

• Young's modulus of steel: $E = 200 \text{ GPa}$

• ultimate compressive strain of concrete: $\epsilon_{cu2} = 0,0035$;

• strain in steel – $\epsilon_{yk} = \frac{f_{yk}}{E_s} = \frac{500 \text{ MPa}}{200000 \text{ MPa}} = 0,0025$

• ultimate effective depth of the compression zone

$$\xi_{eff,lim} = \lambda \cdot \left(\frac{\epsilon_{cu2}}{\epsilon_{cu2} + \epsilon_{yk}} \right) = 0,8 \cdot \left(\frac{0,0035}{0,0035 + 0,0025} \right) = 0,467$$

• depth of the compression zone

$$x_{eff} = \frac{A_{s1,w} \cdot f_{yk}}{b \cdot f_{ck}} = \frac{628 \text{ cm}^2 \cdot 500 \text{ MPa}}{350 \text{ mm} \cdot 35 \text{ MPa}} = 26 \text{ mm}$$

$$\xi_{eff} = \frac{x_{eff}}{d_w} = \frac{26 \text{ mm}}{260 \text{ mm}} = 0,100 < \xi_{eff,lim} = 0,467$$

• connection capacity

$$0,026 \text{ m} \cdot 0,35 \text{ m} \cdot 35 \text{ MPa} \cdot \left[0,26 \text{ m} - \left(\frac{0,026 \text{ m}}{2} \right) \right] = 0,5 \cdot P_{Ek} \cdot 0,6 \text{ m}$$

$$P_{Ek} = \frac{0,26 \text{ m} \cdot 0,35 \cdot 35 \text{ MPa} \cdot \left[0,26 \text{ m} - \left(\frac{0,026 \text{ m}}{2} \right) \right]}{0,5 \cdot 0,6 \text{ m}} = 262 \text{ kN}$$

$$M_{Ek} = 0,5 \cdot P_{Ek} \cdot 0,6 \text{ m} = 0,5 \cdot 262 \text{ kN} \cdot 0,6 \text{ m} = 78,6 \text{ kNm}$$

Experimental results and analysis

All tested elements were subjected to static loading. Cracking of the elements, deflection and opening of the joint interface were recorded. The results, together with their mean values, are summarised in the table. The letter R denotes specimens with

The results achieved in tests

Wyniki uzyskane z badań

Connection/ Połączenie	Part designation/ Oznaczenie elementu	Maximum force [kN]/ Maksymalna siła [kN]	Average force/ Wartość średnia siły [kN]	Maximum deflection/ Maksymalne ugięcie [mm]	Average value of maxi- mum deflection [mm]/ Średnia wartość mak- symalnego ugięcia [mm]	Maximum contact opening [mm]/ Maksymalne roz- warcie styku [mm]	Average value of the maxi- mum contact opening [mm]/ Średnia wartość maksymal- nego rozwarcia styku [mm]
By exten- sion/Na wytyki	R-1	349,6	338,8	36,7	34,7	26,5	22,6
	R-2	324,1		31,9		17,3	
	R-3	342,7		35,6		24,1	
Screw-type system/ Systemowe skręcane	S-1	323,0	322,2	48,1	45,5	32,1	32,2
	S-2	317,1		41,4		30,3	
	S-3	326,5		47,1		34,1	

• wytrzymałość charakterystyczna betonu C35/45 na ścis-
kanie $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$;

• współczynnik określający wysokość prostokątnego wykre-
su naprężeń w betonie w przypadku $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ wynosi $\lambda = 0,8$;

• charakterystyczna granica plastyczności stali zbrojenio-
wej B500SP – $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$;

• pole przekroju zbrojenia w połączeniu – $2\phi 20, A_{s1,w} = 628 \text{ cm}^2$;

• odległość od krawędzi przekroju do wypadkowej siły
w zbrojeniu – $a_{1,w} = 90 \text{ mm}$;

• wysokość użyteczna przekroju – $d_w = h - a_{1,w} = 350 \text{ mm} - 90 \text{ mm} = 260 \text{ mm}$;

• moduł Younga stali – $E = 200 \text{ GPa}$;

• graniczne odkształcenie betonu przy ściskaniu – $\epsilon_{cu2} = 0,0035$;

• odkształcenie stali – $\epsilon_{yk} = \frac{f_{yk}}{E_s} = \frac{500 \text{ MPa}}{200000 \text{ MPa}} = 0,0025$

• graniczny, efektywny zasięg strefy ściskanej

$$\xi_{eff,lim} = \lambda \cdot \left(\frac{\epsilon_{cu2}}{\epsilon_{cu2} + \epsilon_{yk}} \right) = 0,8 \cdot \left(\frac{0,0035}{0,0035 + 0,0025} \right) = 0,467$$

• wysokość strefy ściskanej

$$x_{eff} = \frac{A_{s1,w} \cdot f_{yk}}{b \cdot f_{ck}} = \frac{628 \text{ cm}^2 \cdot 500 \text{ MPa}}{350 \text{ mm} \cdot 35 \text{ MPa}} = 26 \text{ mm}$$

$$\xi_{eff} = \frac{x_{eff}}{d_w} = \frac{26 \text{ mm}}{260 \text{ mm}} = 0,100 < \xi_{eff,lim} = 0,467$$

• nośność połączenia

$$0,026 \text{ m} \cdot 0,35 \text{ m} \cdot 35 \text{ MPa} \cdot \left[0,26 \text{ m} - \left(\frac{0,026 \text{ m}}{2} \right) \right] = 0,5 \cdot P_{Ek} \cdot 0,6 \text{ m}$$

$$P_{Ek} = \frac{0,26 \text{ m} \cdot 0,35 \cdot 35 \text{ MPa} \cdot \left[0,26 \text{ m} - \left(\frac{0,026 \text{ m}}{2} \right) \right]}{0,5 \cdot 0,6 \text{ m}} = 262 \text{ kN}$$

$$M_{Ek} = 0,5 \cdot P_{Ek} \cdot 0,6 \text{ m} = 0,5 \cdot 262 \text{ kN} \cdot 0,6 \text{ m} = 78,6 \text{ kNm}$$

Wyniki i analiza badań

Wszystkie badane elementy obciążano w sposób statyczny, odnotowując zarysowanie elementów, ugięcie oraz rozwarcie styku połączenia. Wyniki wraz z wartościami średnimi zestawiono w tabeli. Literą R oznaczono elementy z połączeniem na wyty-

joints using projecting bars, whereas the letter S denotes specimens with proprietary bolted joints. Representative force – joint-opening and force – deflection curves are presented in Figures 4 and 5. Interpretation of these relationships makes it possible to characterise the static behaviour of the joints. The joint using projecting bars grouted inside Robusta pipes achieved a higher load at lower values of deflection and joint opening than the proprietary bolted joint. This indicates a higher rotational stiffness of the projecting-bar joint. For this connection, a reduction in load was observed after the maximum load had been reached. In contrast, the proprietary system joint reached its maximum load at greater vertical deformations of the beam (deflections) than the projecting-bar joint. No reduction in load-bearing capacity was observed after the maximum load was reached, indicating greater ductility. Figures 4 and 5 show that the static equilibrium path for the proprietary bolted joint exhibits non-linear behaviour at an early stage of loading, indicating a shorter elastic range of the connection. When designing such joints, the serviceability limit state associated with cracking should also be considered. In both analysed connection types, significant joint openings, ranging from 17.3 to 34.1 mm, and extensive cracking in the anchorage zone of the steel consoles were observed before the maximum load-bearing capacity was reached.

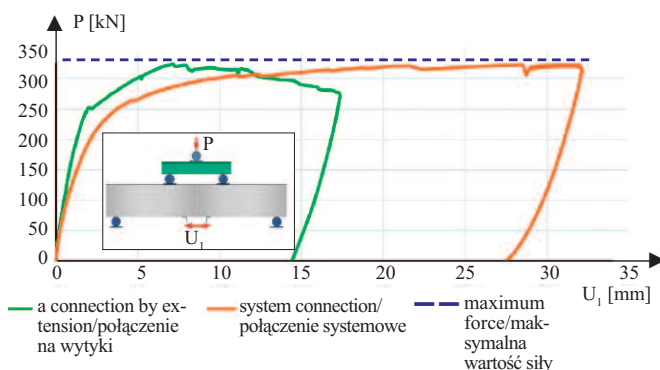


Fig. 4. The influence of force on the opening of a joint
Rys. 4. Zależność rozwarcia styku od siły

All three specimens with projecting-bar joints exhibited the same failure mechanisms. During testing, the joint opened and the grout detached from one or two beam segments (Photo 2a). Crushing of the concrete occurred in the compression zone. In each specimen, the height of the crushed zone was approximately 5 cm (Photo 2b). The reinforcing bars forming the projecting bars yielded plastically but did not fracture. The load-bearing capacity of the joint was governed by the compressive strength of the concrete.

The specimens with proprietary bolted connections exhibited a different failure mechanism. As the load increased, extensive cracking developed around the steel system consoles. The cracking zone propagated, forming a triangular concrete breakout wedge in the tension zone. The grout located within the console of the proprietary system was also spalled (Photo 3a). In the tension zone, no joint opening was observed at the locations of the bolted connection, i.e. at the corners of the cross-section. In the central part of the element, however, the joint opening reached a maximum value of 20 mm. After the

ki, a literą S elementy z systemowym połączeniem skręcanym. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono reprezentatywne wykresy zależności siła – rozwarcie styku oraz siła – ugięcie. Interpretacja tych zależności pozwala określić charakter pracy statycznej połączeń. Połączenie na wytyki zmonolizowane w rurach robusta charakteryzuje się osiągnięciem większej siły przy mniejszych wartościach ugięcia i rozwarcia styku niż połączenie systemowe. Świadczy to o większej sztywności obrotowej połączenia na wytyki. W połączeniu tym zaobserwowano spadek siły po osiągnięciu wartości maksymalnej. Z kolei połączenie systemowe osiąga maksymalną nośność przy większych deformacjach pionowych belki (ugięciach) niż połączenia na wytyki. Połączenie to nie wykazuje spadku nośności po osiągnięciu maksymalnej siły, co świadczy o większej jego ciągliwości. Na rysunkach 4 i 5 można zaobserwować, że ścieżka równowagi statycznej w przypadku połączenia systemowego wykazuje nieliniowy charakter we wczesnej fazie pracy (mniejszy zakres fazy sprężystej połączenia). Podczas projektowania należy również zwrócić uwagę na stan graniczny użyteczności ze względu na zarysowanie konstrukcji. W obu analizowanych połączeniach, przed osiągnięciem maksymalnej nośności, występują duże rozwarcia styku (od 17,3 do 34,1 mm) oraz rozległe zarysowanie w strefie zakotwienia konsol stalowych.

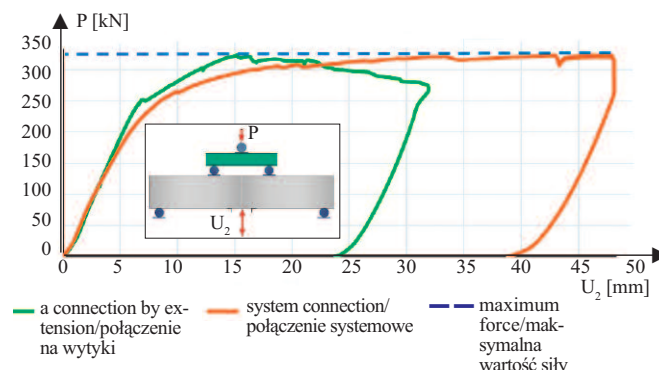


Fig. 5. The influence of force on the deflection of a joint
Rys. 5. Zależność ugięcia od siły

Trzy elementy z połączeniem na wytyki wykazywały takie same mechanizmy zniszczenia. Podczas badania doszło do rozwarcia styku połączenia oraz odspojenia podlewki od jednego lub dwóch segmentów belki (fotografia 2a). Nastąpiło zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej. W każdym z elementów wysokość zniszczonej strefy wynosiła ok. 5 cm (fotografia 2b). Pręty zbrojeniowe wytyków uległy uplastycznieniu, ale nie zostały zerwane. O nośności połączenia zdecydowała wytrzymałość betonu na ściskanie.

W elementach ze skręcanym połączeniem systemowym uzyskano odmienny mechanizm zniszczenia. Podczas badania wraz ze wzrostem siły dochodziło do silnego zarysowania elementów wokół systemowych konsol stalowych. Strefa zarysowania propagowała, tworząc trójkątny klin odłamu betonu w strefie rozciąganej. Wykruszeniu uległa również zaprawa znajdująca się w konsoli rozwiązania systemowego (fotografia 3a). W strefie rozciąganej, w miejsca połączenia śrubowego (w narożach przekroju) nie zaobserwowano rozwarcia styku, natomiast w środkowej części elementu

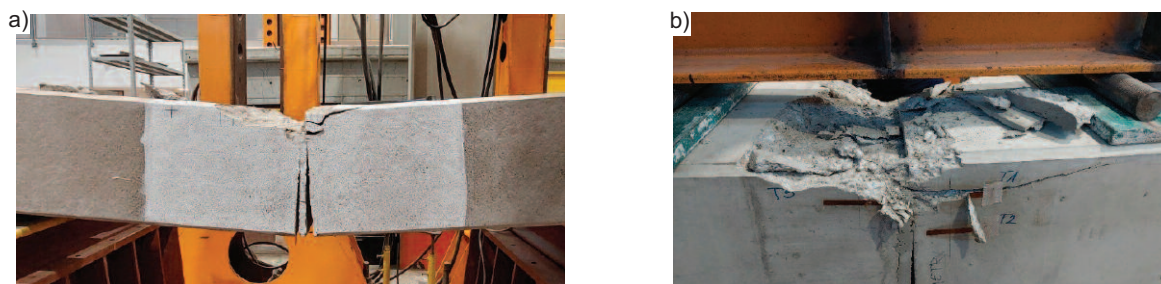


Photo 2. The damaged section: a) contact opening; b) compression zone
Fot. 2. Zniszczony element: a) rozwarcie styku; b) strefa ściskana

concrete was broken away, deformed and plastically yielded anchorage bars securing the proprietary system supports were observed near the column supports (Photo 3c). In the compression zone of the cross-section, the steel proprietary supports were subjected to bearing contact, followed by crushing of the concrete. Due to the presence of steel consoles and the heavily reinforced anchorage zone, the height of the crushed concrete wedge was approximately 1 cm (Photo 3b). Photo 4 presents an image obtained using the Digital Image Correlation (DIC) method [7]. The technique enabled the development and morphology of cracks and extensive cracking on the surface of the tested element to be captured.

rozwarcie styku osiągnęło maksymalnie wartość 20 mm. Po rozkuciu betonu zaobserwowano w okolicy podpór słupowych zdeformowane oraz uplastycznione pręty kotwiące podpory systemowe (fotografia 3c). W części ściskanej przekroju doszło do docisku stalowych, systemowych podpór, a następnie do zmiążdżenia betonu. Ze względu na obecność stalowych konsol oraz silnie zbrojone zakończenie, wysokość klina zmiążdżonego betonu wynosiła ok. 1 cm (fotografia 3b). Na fotografii 4 przedstawiono morfologię rys i silne zarysowanie na powierzchni badanego elementu uzyskane metodą DIC – *Digital Image Correlation* [7].

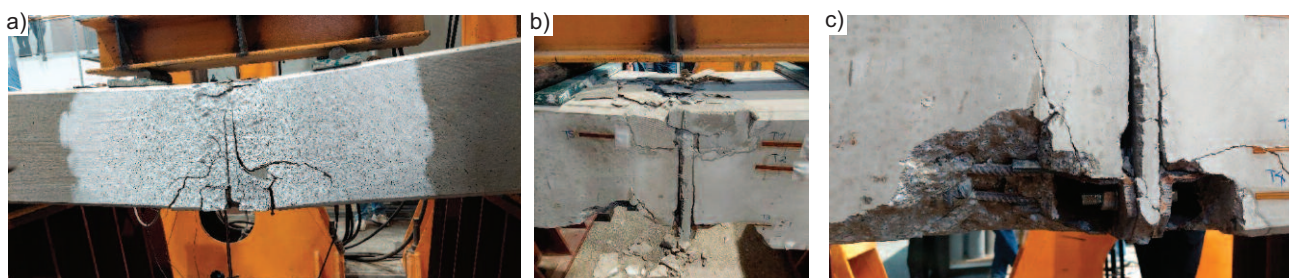


Photo 3. The damaged section: a) scratches on the section; b) compressed zone; c) system console anchor bars after the concrete has been chiselled away
Fot. 3. Zniszczony element: a) zarysowanie elementu; b) strefa ściskana; c) pręty kotwiące konsolę systemową po rozkuciu betonu

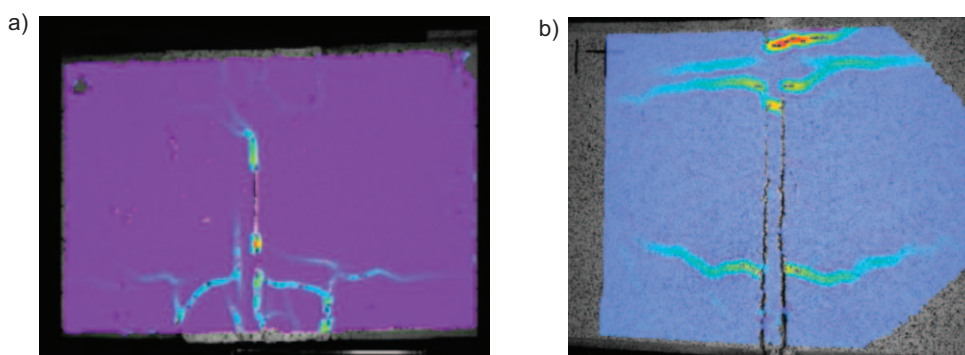


Photo 4. An image from DIC cameras showing the development of cracks in the tested: a) bolted joint, b) with a Robusta pipe
Fot. 4. Obraz z kamer DIC przedstawiający rozwój rys w badanym połączeniu: a) skręcany; b) na wtyki

Summary

The paper presents destructive tests of two types of butt joints used in precast reinforced concrete structures: joints using projecting bars grouted inside Robusta pipes and proprietary bolted connection systems. All analysed specimens

Podsumowanie

W artykule przedstawiono badania niszczące dwóch typów połączeń doczołowych, stosowanych w żelbetowych konstrukcjach prefabrykowanych. Są to połączenie na wtyki zatopione w rurach robusta i systemowe połączenie

achieved load-bearing capacities higher than those estimated analytically, with the experimental values being approximately 30% higher. Based on the test results, it was found that, despite only approximately 5% higher load-bearing capacity, the projecting-bar joint exhibited approximately 24% lower deflection than the proprietary bolted joint. This indicates a higher stiffness of the projecting-bar connection.

The tested proprietary bolted connection exhibited a greater increase in deflection at a lower load than the traditional projecting-bar joint. The most significant difference concerned the behaviour of the joints after reaching their maximum load-bearing capacity. In the projecting-bar joint, crushing of the concrete occurred in the compression zone after the maximum load was reached, followed by a loss of load-bearing capacity. In the proprietary bolted joint, extensive cracking of the element, yielding of the steel and significant plastic deformations of the steel plates and their anchorage occurred first. It should be emphasised that the serviceability limit state associated with cracking was not considered in the assessment of load-bearing capacity, although it may be decisive in the design of this type of connection.

The experimental results indicate that the proprietary bolted connection is more favourable in terms of deformability, ductility and energy absorption capacity, while maintaining a maximum load-bearing capacity comparable to that of the connection using Robusta pipes and projecting bars. The proprietary bolted connection is more deformable than the projecting-bar joint, indicating a greater capacity for force redistribution and the ability to provide warning of impending loss of load-bearing capacity before complete failure. The projecting-bar joint, on the other hand, exhibits a more rapid loss of load-bearing capacity after reaching the maximum load, indicating a more brittle failure mode. Therefore, in situations where structural resistance to large deformations, exceptional loads or a high safety reserve is required, the use of a proprietary bolted connection is more advantageous.

Photos and figures: authors

Received: 30.03.2026

Revised: 05.05.2026

Published: 23.09.2026

skręcane. Wszystkie z analizowanych elementów uzyskały nośność większą niż oszacowana analitycznie (ok. 30% większe wartości nośności). Na podstawie wyników stwierdzono, że przy większej o ok. 5% nośności połączenia na wytyki, charakteryzuje się ono mniejszym ugięciem o ok. 24% niż systemowe połączenie skręcane. Świadczy to o większej sztywności tego połączenia.

Badane skręcane połączenie systemowe wykazało większy przyrost ugięcia przy mniejszej sile niż połączenie tradycyjne na wytyki. Największa różnica dotyczy zachowania po osiągnięciu nośności maksymalnej. W połączeniu na wytyki po osiągnięciu maksymalnej siły następuje zmiażdżenie betonu w strefie ściskanej i połączenie traci nośność. W systemowym połączeniu skręcanym obserwujemy natomiast w pierwszej kolejności duże zarysowanie elementu, uplastycznienie stali i duże plastyczne deformacje stalowych blach wraz z zakotwieniem. Należy podkreślić, że podczas analizy nośności pominięto Stan Graniczny Użytkowania ze względu na zarysowanie, który może być decydujący podczas projektowania tego typu połączeń.

Z przeprowadzonych badań wynika, że systemowe połączenie skręcane jest rozwiązaniem korzystniejszym pod względem odkształcalności, ciągliwości oraz zdolności pochłaniania energii, przy zachowaniu nośności maksymalnej porównywalnej z połączeniem na rury karbowane i wytyki. Połączenie systemowe jest bardziej odkształcalne niż połączenie na wytyki, co oznacza większą zdolność do redystrybucji sił i sygnalizację utraty nośności przed całkowitym zniszczeniem. Połączenie na wytyki charakteryzuje się natomiast szybszą utratą nośności po osiągnięciu wartości maksymalnej, co wskazuje na bardziej kruchy charakter zniszczenia. Taki wynik sugeruje, że w sytuacjach, gdzie istotna jest odporność konstrukcji na duże przemieszczenia, wyjątkowe obciążenia lub wymagana jest duża rezerwa bezpieczeństwa, korzystniejsze jest zastosowanie systemowego połączenia skręcanego.

Fotografie i rysunki: autorzy

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.03.2026 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 05.05.2026 r.

Opublikowano: 23.09.2026 r.

Literature

- [1] Adamczewski G, Woyciechowski P. Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność. Zeszyt 1. Stowarzyszenie Producentów Betonów, Warszawa, 2014.
- [2] Starosolski W. Połączenia w żelbetowych konstrukcjach szkieletowych. Arkady, Warszawa, 1993.
- [3] Pfeifer, Katalog: Łączniki słupowe PCC Pfeifer – porównanie z połączeniem na wytyki, Kępice k/Wrocławia, 2024.
- [4] Wojciechowski Sz, Andrzejewski W, Józefczyk Ł. Sztywność giętna połączeń prefabrykowanych słup – fundament montowanych na wytyki. Materiały Budowlane. 2026; nr 1: 93 – 94.
- [5] Fan JJ, Feng DC, Wu G, Hou S, Lu Y. Experimental Study of Prefabricated RC Column-Foundation Assemblies with Two Different Connection Methods and using Large-Diameter Reinforcing Bars. Engineering Structures. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110075>.
- [6] Zhang G, Han Q, Xu K, Du X, He W. Quasi-static tests of CFST embedded RC column-to-precast cap beam with socket connection. Engineering Structures. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112443>.
- [7] Marcinczak D. Metoda DIC. Builder. 2019; <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.3444>.